

Übung zur theoretischen Physik neuronaler Informationsverarbeitung
 (Prof. J. L. van Hemmen)

Aufgabe 1: Hopfield-Modell

Gegeben seien N Neuronen mit Zuständen $S_i(t) \in \{+1, -1\}$ zur Zeit t und q Muster $\xi_i^\mu \in \{+1, -1\}$, wobei $1 \leq i \leq N$ und $1 \leq \mu \leq q$. Die Muster $\xi^\mu = (\xi_1^\mu, \dots, \xi_N^\mu)$ bestehen aus unabhängigen, identisch verteilten Zufallszahlen mit Mittelwert 0. Das lokale Potential $h_i(t)$ an Neuron i ist

$$h_i(t) = \sum_{j=1}^N J_{ij} S_j(t). \quad (1)$$

Der Zustand \mathbf{S} zu Zeitschritt $t + \Delta t$ ergibt sich aus dem Zustand zur Zeit t entsprechend der deterministischen Dynamik

$$S_i(t + \Delta t) = \text{sgn}(h_i(t)). \quad (2)$$

Die q Muster seien zuvor bereits durch die Hebb'sche Regel

$$J_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{\mu=1}^q \xi_i^\mu \xi_j^\mu & \text{für } i \neq j \\ 0 & \text{für } i = j \end{cases} \quad (3)$$

gelernt worden. Ein derartiges Netzwerk stellt einen assoziativen Speicher dar, dessen Attraktoren den gespeicherten Mustern entsprechen.

1. Der Anfangszustand des Netzes sei ein beliebiges Muster (z.B. $\mathbf{S}(t_0) = \xi^\nu$). Berechnen Sie die maximal speicherbare Zahl der Muster q_{\max} für $N \rightarrow \infty$, wenn zur Zeit $t_0 + \Delta t$
 - (a) die Wahrscheinlichkeit, dass ein beliebiges Neuron instabil ist, näherungsweise kleiner als 1 % sein soll.
 - (b) alle Spins mit 99 %-iger Wahrscheinlichkeit richtig sein müssen.
 Hinweis: Verwenden Sie für das Gauß'sche Fehlerintegral

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4)$$

die Abschätzung

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-x^2}}{x + \sqrt{x^2 + 2}} < 1 - \text{erf}(x) \leq \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-x^2}}{x + \sqrt{x^2 + \frac{4}{\pi}}}. \quad (5)$$

2. (a) Zeigen Sie, dass

$$H(t) = - \sum_{i=1}^N |h_i(t)| \quad (6)$$

eine Lyapunovfunktion bezüglich der oben angegebenen Dynamik mit beliebigen J_{ij} ist.

(b) Zeigen Sie, dass bei zufällig gewählten Synapsenstärken J_{ij} (z.B. gleichverteilt aus $[-1, 1]$) die Dynamik mit Wahrscheinlichkeit 1 entweder zu einem Fixpunkt konvergiert oder zu einem $2\Delta t$ -periodischen Grenzyklus.

Aufgabe 2: Simulation eines Hopfield-Netzes

Berechnen Sie die zeitliche Entwicklung eines Hopfield-Netzes aus $N = 100$ Neuronen im Computer.

Bestimmen Sie dazu zunächst q Muster ξ^μ , $1 \leq \mu \leq q$, wobei die ξ_i^μ mit jeweils Wahrscheinlichkeit $1/2$ auf $+1$ oder -1 gesetzt werden. Berechnen Sie dann nach (3) die synaptischen Gewichte J_{ij} .

Lassen Sie das Netzwerk mit allen Mustern als Anfangszustand, also

$$S_i(t_0) = \xi_i^\mu, \quad (7)$$

für $\mu = 1, \dots, q$, laufen.

Wieviele Muster werden korrekt „erinnert“, sind also Fixpunkte unter der Dynamik (2)?

Berechnen Sie mit Ihrem Programm, welcher Prozentsatz an Mustern korrekt erinnert wird für $q = 1, \dots, 100$.

Steigern Sie auf $N = 1000$ Neuronen und $q = 10, 20, 30, \dots, 200!$

Besprechung der Übungen am Freitag, den 8.7.2005 um 9.15 Uhr im Seminarraum 3024 von E22 (Garching).

Übungsleitung:

Moritz Franosch, mail@Franosch.org, <http://www.physik.tu-muenchen.de/lehrstuehle/T35/>.